

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АКУМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ. ЧАСТИНА I: КОРОТКИЙ АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Пушніцин Д. С., асп., Ніконенко Є. О., студ., Пересада С. М., д.т.н., проф.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Розвиток електричних транспортних засобів обумовлює потребу в моделях, що достатньо точно відображають характер процесів, які виникають в акумуляторних батареях (АКБ) при роботі електропривода, оскільки саме АКБ є основним джерелом енергії в автономному наземному електротранспорті [1].

Моделювання АКБ є складною задачею через електрохімічну природу процесів, що протікають всередині них. На характер цих процесів впливає низка факторів, такі як: температура, значення і напрямки струму, відпрацьований ресурс тощо. Врахування всіх можливих факторів сильно збільшує необхідну обчислювальну потужність керуючого пристрою [2].

Однією з головних характеристик АКБ є його ефективна ємність Q_{EN} . Фактично, вона визначає максимальну доступну кількість енергії, яку АКБ може віддати без суттєвої деградації (перерозряду). З фізичної точки зору, ефективна ємність відповідає заряду, збереженому в АКБ за визначених зовнішніх умов (наприклад, температура, вік, кількість циклів перезаряду і т.п.). Для ефективного використання ресурсів АКБ необхідно, окрім визначення ефективної ємності, відслідковувати в реальному часі зміну доступного заряду. Для цього вводиться поняття стану заряду (State of Charge, SOC), що вимірюється у відсотках від ефективної ємності. Складність полягає в тому, що як стан заряду, так і ефективна ємність, є невимірюваними змінними, з чого витікає необхідність використання алгоритмів оцінювання обох цих параметрів для якісної роботи систем керування АКБ (Battery Management System, BMS).

Адекватне відображення динамічної поведінки змінних АКБ, зокрема SOC, в різних режимах роботи є на сьогодні дуже важливою задачею електротехніки та електрохімії. Причому найбільш гострим є компроміс між точністю опису процесів і складністю обчислень.

Метою даної роботи є аналіз існуючих моделей і обґрунтування вибору моделі АКБ для використання автономних в електричних транспортних засобах.

Матеріали дослідження. На сьогодні в електротехніці, зокрема в електротранспорті, найбільш уживаними є свинцево-кислотні та літій-іонні/літій-полімерні акумулятори [1], [3].

Свинцево-кислотні акумулятори (Lead-acid battery) - це найстаріший тип АКБ. Вони широко застосовуються в автономних джерелах живлення, джерелах безперебійного живлення і т.п. Однак, головними недоліками цього типу акумуляторів є низька питома енергія, великий час заряду та малий ресурс перезарядів. Додатково в них явно спостерігається явище гістерезису (рис. 1), що ускладнює модель, зокрема визначення стану заряду по кривій розряду [4].

Літій-іонні і літій-полімерні акумулятори на сьогодні є найбільш уживаним в електротехніці, починаючи від мобільних телефонів та портативних пристроїв і закінчуючи електромобілями. Це пояснюється високими питомими енергією та потужністю, а також дуже великим ресурсом роботи [5], [6].

Порівняльна характеристика розглянутих типів АКБ представлена в табл. 1.

Для моделювання електрохімічних процесів, що виникають в АКБ найчастіше використовуються модифіковану модель Шеферда [7], схемо-орієнтовні [8] – [12], та електрохімічні [13] – [15] моделі. Останні через високий порядок моделі та, як наслідок, високе обчислювальне навантаження на керуючий пристрій не набули широкого застосування в сфері електротранспорту. В той же час, у випадку довготривалих низько-динамічних процесів використання електрохімічних моделей є виправданим і навіть більш бажаним, ніж інші види моделей [16].

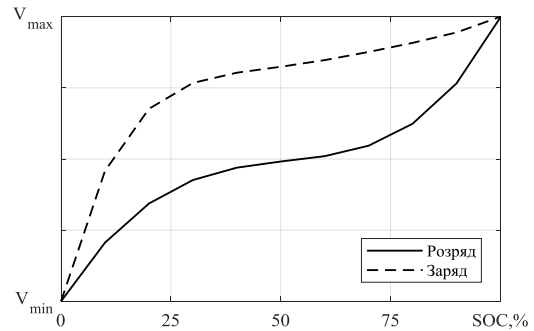


Рисунок 1 – Явище гістерезису при перезарядці свинцево-кислотних акумуляторів

Таблиця 1 – Порівняння характеристик різних типів АКБ [5]

Параметр	Lead-acid	Li-ion/LiPo/ LiFePO ₄
Питома енергія, Вт·год/кг	35..50	118..250
Максимальна питома потужність, Вт / кг	180...250	200...4500
Ресурс роботи, циклів	1000	2000+

Модифікована модель Шеферда [7] є простотою з точки зору математичного опису і дозволяє визначити параметри з номінальної кривої розряду, що надається виробником. Динамічна поведінка батареї (на прикладі свинцево-кислотної батареї) описується системою 3 порядку зі змінною структурою:

$$\begin{aligned}
 E_{bt} &= E_0 - K_1 \frac{Q}{Q - i_t} i_t - K_2 \frac{Q}{Q - i_t} i_f + E_{exp} \\
 \dot{i}_f &= (-i_f + i_{bt}) / T_f \\
 \dot{i}_t &= \frac{1}{3600} i_{bt} \\
 \dot{E}_{exp} &= -E_{exp} V i_{bt}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} E_{bt} &= E_0 - K_1 \frac{Q}{Q - i_t} i_t - K_2 \frac{Q}{Q - i_t} i_f + E_{exp} \\ \dot{i}_f &= (-i_f + i_{bt}) / T_f \\ \dot{i}_t &= \frac{1}{3600} i_{bt} \\ \dot{E}_{exp} &= -E_{exp} V i_{bt} \end{aligned}} \right| \text{при розряді} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
E_{bt} &= E_0 - K_1 \frac{Q}{Q - i_t} i_t - K_2 \frac{Q}{i_t + k_c Q} i_f + E_{exp} \\
\dot{i}_f &= (-i_f + i_{bt}) / T_f \\
\dot{i}_t &= \frac{1}{3600} i_{bt} \\
\dot{E}_{exp} &= B |i_{bt}| (-E_{exp} + A) \\
SOC &= (i_t(0) - i_t) / Q_{EN}
\end{aligned}
\quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right| \text{при заряді} \quad (2)$$

де E_0 – ідеальна ЕРС батареї (В), K_1 – поляризаційна константа (В/А·год), K_2 – поляризаційний опір (Ом), при чому $|K_1| = |K_2|$; Q – максимальна ємність АКБ (А·год), i_{bt} – струм батареї, k_c – коефіцієнт, що визначає споживаний струм повністю зарядженої АКБ, T_f – стала часу лінійного фільтру, A і B – відповідно амплітуда і стала часу експоненційної частини кривої розряду, E_{bt} – ЕРС, SOC – стан заряду.

Недоліком такої моделі є те, що вона не враховує старіння, температурний вплив та інші фактори, що загалом може призвести до суттєвої відмінності моделі від реальної батареї.

До схемо-орієнтованих моделей відносять в першу чергу модель Тевеніна (рис. 2) [8].

Математична модель АКБ, відповідно до схеми заміщення, що складається з n послідовних ланок, може бути записана як

$$\begin{aligned}
\dot{u}_{Di} &= -\frac{1}{R_{Di} C_{Di}} u_{Di} + \frac{1}{C_{Di}} i_L \\
u_t &= u_{xx}(SOC) - R_i i_L - \sum_{i=1}^n u_{Di} \\
SOC &= SOC(0) - \eta \int_0^t i_L / Q_{EN} dt
\end{aligned} \quad (3)$$

де u_{Di} – напруга на i -й послідовній ланці ($i = 1..n$), R_{Di}, C_{Di} – відповідно опір та ємність i -ої послідовної ланки, що описують динамічну поведінку, R_i – внутрішній опір АКБ, i_L – струм АКБ, $u_{xx}(SoC)$ – напруга холостого ходу та u_t – напруга на клеммах АКБ, SOC – стан заряду, η – ефективність процесу заряду або розряду, Q_{EN} – максимальний ефективний або номінальний заряд (в залежності від мети дослідження) [17].

В [8] вказано, що кількість послідовних RC ланок визначається виключно точністю, яку необхідно забезпечити. В той же час, в ряді публікацій показано,

що використання від 1 до 3 ланок забезпечує достатню точність для більшості технологічних процесів та об'єктів [8] – [12].

Окрім послідовного з'єднання RC ланок, часто застосовуються схеми заміщення АКБ, що представляють собою деяку кількість паралельних ланок [18]. Загальний принцип залишається незмінним – кількість ланок визначається необхідною точністю відображення процесів.

Загальний недолік таких моделей полягає в нехтуванні нелінійностями та варіаціями параметрів, що існують в реальному об'єкті. Спроби врахування цих варіацій представлені в літературі, наприклад в [9], [19] – [21]. Тут враховувалось, що параметри АКБ змінюються відповідно до стану заряду, температури, споживаного струму та інших факторів. Подібна модифікація моделі дійсно підвищує точність, однак визначення аналітичних залежностей варіацій параметрів суттєво ускладнює процес офф-лайн і он-лайн ідентифікації параметрів.

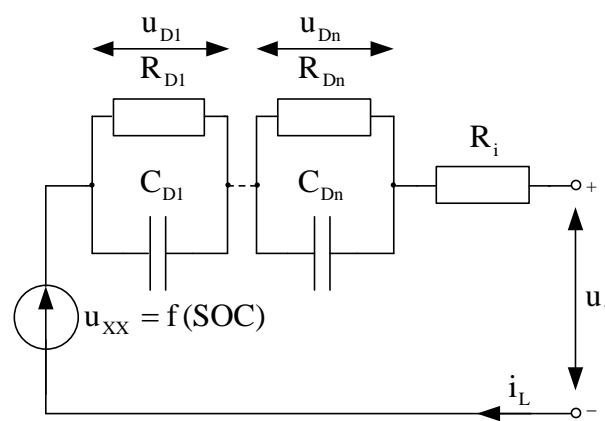


Рис. 2 – Схема заміщення батареї згідно моделі Тевеніна

Таким чином, для використання в електротранспорті, компромісним варіантом є використання моделей з 1-2 сталими часу без врахування варіації параметрів.

Висновки. Представлено огляд основних найбільш уживаних моделей акумуляторних батарей. Показано, що для моделювання процесів, що відбуваються в свинцево-кислотних АКБ доцільно використовувати модифіковану модель Шеферда, в той час, як для Li-ion/Li-PO акумуляторних батарей можна використовувати як модифіковану модель Шеферда, так і модель Тевеніна з кількістю послідовних ланок, що дорівнює 1-3.

Перелік посилань

1. Khaligh A. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art / A. Khaligh, Z. Li // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Vol. 59. – № 6. – P. 2806-2814.
2. Hentunen A. Time-Domain Parameter Extraction Method for Thévenin-Equivalent Circuit Battery Models / A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2014. – Vol. 29. – № 3. – P. 558-566.
3. Electrochemical and Electrostatic Energy Storage and Management Systems for Electric Drive Vehicles: State-of-the-Art Review and Future Trends / E. Chemali [et al.] // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2016. – Vol. 4. – № 3. – P. 1117-1134.
4. A novel rapid charger for lead-acid batteries with energy recovery / H.-J. Chiu [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21. – № 3. – P. 640-647.
5. Tie S.F. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles / S.F. Tie, C.W. Tan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 20. – P. 82-102.

6. An Overview and Comparison of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Battery / J. Meng [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 54. – № 2. – P. 1583-1591.
7. Tremblay O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3.
8. Sun F. A systematic state-of-charge estimation framework for multi-cell battery pack in electric vehicles using bias correction technique / F. Sun, R. Xiong, H. He // Applied Energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 1399-1409.
9. Chen M. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance / M. Chen, G.A. Rincon-Mora // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 21. – № 2. – P. 504-511.
10. Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications / M. Einhorn [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28. – № 3. – P. 1429-1437.
11. Xiong R. Research on an Online Identification Algorithm for a Thevenin Battery Model by an Experimental Approach / R. Xiong, H. He, K. Zhao // International Journal of Green Energy. – 2014. – Вып. 12. – С. 272-278.
12. He H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // Energies. – 2011. – Vol. 4. – № 4. – P. 582-598.
13. Doyle M. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell / M. Doyle // Journal of The Electrochemical Society. – 1993. – Vol. 140. – № 6. – P. 1526.
14. Fuller T.F. Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell / T.F. Fuller // Journal of The Electrochemical Society. – 1994. – Vol. 141. – № 1. – P. 1.
15. Algorithms for Advanced Battery-Management Systems / N.A. Chaturvedi [et al.] // IEEE Control Systems Magazine. – 2010. – Vol. 30. – № 3. – P. 49-68.
16. On the Suitability of Electrochemical-Based Modeling for Lithium-Ion Batteries / R. Gu [та ін.] // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2016. – Вып. 2. – № 4. – С. 417-431.
17. Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles / R. Xiong [та ін.] // IEEE Access. – 2018. – Вып. 6. – С. 1832-1843.
18. Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles / B.S. Bhangu [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2005. – Vol. 54. – № 3. – P. 783-794.
19. Schweighofer B. Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system / B. Schweighofer, K.M. Raab, G. Brasseur // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2003. – Vol. 52. – № 4. – P. 1087-1091.
20. Verbrugge M.W. Electrochemical characterization of high-power lithium ion batteries using triangular voltage and current excitation sources / M.W. Verbrugge, P. Liu // Journal of Power Sources. – 2007. – Vol. 174. – № 1. – P. 2-8.
21. Verbrugge M.W. Electrochemical and Thermal Characterization of Battery Modules Commensurate with Electric Vehicle Integration / M.W. Verbrugge, R.S. Conell // Journal of The Electrochemical Society. – 2002. – Vol. 149. – № 1. – P. A45.